

Отзыв

официального оппонента на диссертацию

Комогорцева Сергея Викторовича

«Случайная магнитная анизотропия и стохастическая магнитная структура в наноструктурированных ферромагнетиках»,
представляемую к защите на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Актуальность темы исследования

В настоящее время прогресс в области создания новых магнитных материалов в значительной степени связан с разработкой и исследованием наноструктурированных сплавов. Магнитные свойства таких сплавов, полученных в результате быстрой закалки из расплава либо нанокристаллизующего отжига из аморфного состояния, значительно отличаются от свойств привычных поликристаллических сплавов. Причиной отличия является характерное сочетание беспорядка в ориентации кристаллитов нанометрового размера и межзеренного обменного взаимодействия, приводящего к однородной намагниченности в больших ансамблях кристаллических зерен. Усреднение константы магнитной анизотропии кристаллитов в пределах области однородной намагниченности приводит к резкому уменьшению результирующей анизотропии, и, как следствие, коэрцитивной силы с уменьшением размера зерна. Это поведение принципиально отличает наноструктурированные сплавы от их поликристаллических аналогов, где коэрцитивная сила, как правило, увеличивается при уменьшении размера зерна. Оптимальные значения важных для практики магнитных характеристик (намагниченность, коэрцитивная сила, форма петли гистерезиса) обеспечивает своеобразная магнитная микроструктура, обменно-связанное состояние взаимодействующих наноразмерных зерен сплава. При этом важнейшую роль играет магнитная анизотропия отдельных кристаллитов. Традиционные методы исследования магнитной анизотропии в случае нанокристаллических сплавов оказываются мало информативными, поскольку они дают информацию о макроскопической анизотропии образца, тогда как свойства в первую очередь определяются параметрами локальной магнитной анизотропии. В этой связи диссертация С.В. Комогорцева, посвященная развитию экспериментальных техник измерения

локальной магнитной анизотропии на различных масштабах, исследованию магнитной анизотропии, обменных взаимодействий и магнитной микроструктуры по кривым приближения намагниченности к насыщению для различных классов магнитных материалов, представляется актуальной.

Оценка проведенного исследования и полученных результатов

Диссертация содержит введение, восемь глав, заключение и список литературы из 326 наименований.

Во введении автор обосновал актуальность работы, сформулировал ее задачи, отметил новизну, научное и практическое значение результатов, а также привел сведения об апробации работы.

В 1-й главе дан краткий обзор общих представлений и экспериментальных результатов, касающихся особенностей магнитной микроструктуры и свойств наноструктурированных ферромагнетиков со случайно ориентированной локальной осью легкого намагничивания. Кратко приведены теоретические подходы к описанию свойств аморфных и нанокристаллических ферромагнетиков на основе модели случайной магнитной анизотропии. Описаны результаты предшествующих исследований, касающиеся использования закона приближения намагниченности к насыщению для изучения магнитной анизотропии. В конце главы приведена постановка задачи исследования.

Во 2-й главе описан авторский метод изучения области однородной намагниченности, характерного размера наноструктуры и константы локальной магнитной анизотропии, отнесенной к этому размеру. Автор показывает, что анализ кривых намагничивания в области насыщения с помощью законов приближения намагниченности к насыщению, характерных для данных сред, может выступать в качестве метода оценки локальных структурных и магнитных параметров. Изложены и обоснованы теоретические предпосылки, приводящие к предлагаемым формулам для закона приближения намагниченности к насыщению. Проведен детальный анализ экспериментальных ошибок, способов численной обработки экспериментальных данных, возможных вкладов в измеряемую на магнитометре среднюю проекцию намагниченности на направление внешнего магнитного поля.

В 3-й главе описаны результаты экспериментального исследования порошков ферромагнитных наночастиц внутри углеродных нанотрубок, как модельной системы частиц со случайно ориентированной осью легкого намагничивания и отсутствием обменного взаимодействия между частицами. На

основе микроскопических и магнитометрических данных, а также численных оценок, автор аргументировал возможность пренебрежения обменным и диполь-дипольным взаимодействиями между однодоменными частицами. Описаны результаты исследования структуры и магнитных свойств наночастиц Co-Ni, Fe-Ni и Fe₃C, капсулированных внутри углеродных нанотрубок, наночастиц Co в матрице аморфного углерода, наночастиц кобальтового феррита на основе мезопористого диоксида кремния. Показано, что приближение намагниченности к насыщению невзаимодействующих между собой наночастиц следует закону Н.С. Акулова $M \sim H^{-2}$.

В 4-й главе описаны магнитометрические исследования ферромагнитных нанонитей, размещенных внутри углеродных нанотрубок, в качестве примера системы со случайно ориентированной осью легкого намагничивания и корреляциями намагниченности, протяженными в одном измерении. Измерения, проведенные на порошковых образцах, а также на пленке ориентированных углеродных нанотрубок, позволили автору сделать заключение о справедливости закона приближения намагниченности к насыщению, теоретически предсказанного для одномерной цепочки обменно-связанных ферромагнитных зерен.

В 5-й главе описаны результаты изучения тонких пленок Co-P, полученных химическим осаждением на стеклянные подложки. Результаты структурных и магнитных исследований позволяют рассматривать их как модельную систему со случайно ориентированной в плоскости пленки локальной осью легкого намагничивания и корреляциями намагниченности в двух измерениях. Автор показал, что приближение намагниченности к насыщению осуществляется по закону, теоретически предсказанному для сред с двумерными корреляциями намагниченности. Обсуждается связь коэрцитивной силы и параметров стохастического магнитного домена, оцененных из кривых намагничивания. Из анализа кривых приближения намагниченности к насыщению пленок Co/Pd установлено формирование в их магнитной микроструктуре стохастических магнитных доменов – областей однородной намагниченности, размер которых не изменяется с изменением внешнего магнитного поля.

В 6-й главе рассмотрены магнитные свойства лент и покрытий нанокристаллических и аморфных сплавов с размером кристаллического зерна, существенно меньшим их толщины. Эти образцы автор рассматривает как пример материалов с трехмерной системой обменно-связанных зерен либо с трехмерными неоднородностями магнитной анизотропии. Показано, что экспериментальные кривые приближения намагниченности к насыщению

данных сплавов хорошо согласуются с теоретическими выражениями для трехмерной случайно-неоднородной среды. Здесь, так же, как и в двумерном случае, автору удалось наблюдать на низкополевой части кривой намагничивания особенности, связанные с формированием в магнитной микроструктуре стохастических магнитных доменов. Достоверность сделанных выводов подтверждена сравнением магнитометрических данных с результатами, полученными с помощью малоуглового рассеяния нейтронов и магнитной силовой микроскопии. Анализ полученных результатов и обобщение литературных данных позволили установить корреляцию величин коэрцитивной силы сплавов и поля анизотропии стохастического магнитного домена.

В 7-й главе методами численного моделирования исследована корреляционная функция намагниченности и кривая намагничивания для материалов с разной величиной отношения размера зерна к ширине доменной границы. Автор изучил цепочку обменно-связанных наночастиц со случайно ориентированной осью легкого намагничивания. Для частиц размером больше ширины доменной стенки результаты автора совпадают с результатами модели Стонера-Вольфарта. Для малых частиц результаты в малых полях описываются моделью случайной магнитной анизотропии, а в больших полях – теорией ряби намагниченности. На модельной кривой намагничивания автору удалось выделить новый участок, связанный с вращением намагниченности стохастических магнитных доменов. Также в главе численно изучено влияние неоднородности магнитных констант на кривые намагничивания цепочек частиц.

В 8-й главе приведены многочисленные примеры применения развиваемого метода изучения магнитной микроструктуры и локальной магнитной анизотропии для характеристики наноструктурированных магнитных материалов. Автор показывает, что его метод удачно дополняет стандартные методы исследования таких материалов. Показано, что магнитная анизотропия стохастического магнитного домена чувствительна к температурной обработке и структурным особенностям сплавов. Она коррелирует с коэрцитивной силой и шириной линии ферромагнитного резонанса. Представляет интерес оценка величины фрактальной размерности системы обменно-связанных зерен в материалах CoPt и $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})\text{-(SiO}_2\text{)}$, а также оценка величины межгранульного обменного взаимодействия. Зависимость константы магнитной анизотропии наночастиц CoPt от степени упорядочения сплава указывает на формирование тетрагональных доменов упорядочения с размером порядка 10 нм. Особенности магнитных свойств аморфного и нанокристаллического сплава

FeCoВ свидетельствуют о формировании областей с двумерными корреляциями намагниченности.

К наиболее важным научным результатам, полученным диссертантом, относятся:

- Предсказание и обнаружение влияния стохастических магнитных доменов на кривые приближения намагниченности к насыщению;
- Экспериментальное доказательство влияния размерности неоднородности анизотропии либо размерности корреляций намагниченности на кривые приближения намагниченности к насыщению в ферромагнетиках с хаотической локальной осью легкого намагничивания.
- Новое выражение для закона приближения намагниченности к насыщению, количественно описывающее экспериментально наблюдаемый переход между степенными асимптотиками.

Практическая значимость работы

Развитые автором методы анализа приближения намагниченности к насыщению позволяют на основе магнитометрических данных проводить оценки важных для нанокристаллических материалов микроскопических характеристик, таких как размеры стохастического магнитного домена, размерность корреляций намагниченности, величина локальной магнитной анизотропии. Результаты могут быть использованы компаниями, занимающимися производством нанокристаллических сплавов, для разработки эффективных методов экспресс-анализа качества выпускаемой продукции и методов улучшения ее функциональных параметров.

Личный вклад автора

В работах, выполненных в начале 90-х гг. научным консультантом диссертанта Р.С. Исхаковым с соавторами было впервые показано, что из исследования кривой намагничивания возможно определение не только радиуса корреляции неоднородностей, но и их формы, размерности или типа характеризующей их корреляционной функции. Диссертанту удалось развить эти идеи и, на основе экспериментального исследования разнообразных материалов, представить стройную и логичную концепцию использования приближения намагниченности к насыщению для анализа магнитных и структурных характеристик различных классов наноструктурированных магнитных материалов.

Замечания по диссертации

Рецензируемая работа не свободна от отдельных недостатков, в частности:

1. В быстрозакаленных лентах аморфных и нанокристаллических сплавов всегда в той или иной степени присутствует наведенная магнитная анизотропия, связанная с локальными изменениями ближнего порядка, плотности, химического состава, с закалочными напряжениями и другими особенностями быстрой и неравновесной кристаллизации. В диссертации влияние наведенной магнитной анизотропии на закон приближения к насыщению рассматривается лишь в отношении столбчатой микроструктуры пленок CoNiP и только в геометрии, когда анизотропия формы столбчатых выделений перпендикулярна направлению намагничивания. Предположение о том, что наведенная магнитная анизотропия в плоскости лент мала по сравнению с локальной магнитной анизотропией, на мой взгляд, для каждой системы требует более детального обоснования.

2. В выражении для нормированной математической дисперсии поперечных компонент орта намагниченности (соотношение (3) в главе 2 и в автореферате) использован полученный ранее Н.С. Акуловым симметричный коэффициент $a^2 = 1/15$ для одноосной анизотропии и $2/105$ для трехосной. Поскольку автор рассматривает в диссертации широкий спектр разнообразных материалов, было бы полезным вычислить и привести в тексте значения симметричного коэффициента для анизотропии типа «легкая плоскость», а также для кубической анизотропии с осями легкого намагничивания типа $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$.

3. При исследовании пленок Co/Pd возрастание коэрцитивной силы при уменьшении толщины слоев кобальта до 2 нм автор связывает с уменьшением константы обменного взаимодействия почти в 4 раза. Константа определена с использованием аналитического выражения (6), стр. 128, которое предполагает, что обменное взаимодействие однородно в пределах образца. В то же время автор показывает, что пленки гетерофазны. В дополнение к слоям ферромагнитного кобальта и палладия, являющегося обменно-усиленным парамагнетиком Паули, пленки на поверхности раздела слоев содержат фазу CoPd, которая может обладать одноосной анизотропией. Выделение такой фазы может оказывать значительное влияние на форму кривой намагничивания и, соответственно, на достоверность определения константы обменного взаимодействия.

4. Не могу не отметить погрешности в оформлении диссертации. Текст на стр. 32-35 дословно повторяет приведенный выше текст на стр. 19-21. Соответственно, формулы (26-33) главы 1 повторяют формулы (1-8). Задачи работы, сформулированные на стр. 38, в том же виде приведены на стр. 8. В ряде случаев неудачно используется калька с английского языка: «эффект размерности неоднородности анизотропии на кривых приближения намагниченности к насыщению», «фитинг» как процесс обработки экспериментальных данных. В диссертации отсутствует сквозная нумерация формул и рисунков, что затрудняет чтение. Возможно, поэтому некоторые ссылки на формулы, приведенные в предыдущих главах, оказываются некорректными (например, ссылки на закон Блоха на стр. 135, 142, 199, 200; на выражение (6) на стр. 140 и 143). В тексте на стр. 200 говорится, что в таблицах 1 и 2 приведены значения констант обменного взаимодействия A . В действительности такой информации в таблицах нет, а для параметра C указана неверная размерность. Имеются многочисленные орфографические ошибки. Эти мелкие погрешности снижают впечатление от чтения добротного научного труда, каким является данная диссертация.

Общий вывод

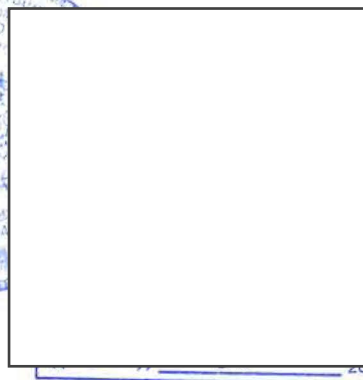
Критический анализ диссертации Комогорцева С.В. позволяет сделать заключение о высоком научном уровне и практической значимости полученных в ней результатов. Работа обладает четкой структурой, материал подается автором в логической последовательности, продиктованной поставленной целью и раскрывающими ее задачами. Математический аппарат используется соискателем корректно. Детально проанализированы возможные источники погрешностей. Диссертация содержит большое количество экспериментального материала, подвергнутого обработке на современном научном уровне. Результаты работы прошли всестороннюю апробацию на российских и международных конференциях.

В целом, считаю, что работа Комогорцева С.В. представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение важной научной задачи, связанной с анализом процессов намагничивания нанокристаллических магнитных материалов. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и представленные в ней выводы. Профиль диссертации соответствует формуле специальности 01.04.11 (физика магнитных явлений), а сама работа по своему научному уровню, значению и достоверности новых результатов полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к

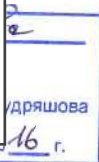
докторским диссертациям, и удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней». Таким образом, Сергей Викторович Комогорцев заслуживает присуждения ученой степени доктора физ.-мат. наук по указанной выше специальности.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией ферромагнитных сплавов
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
доктор физико-математических наук (01.04.11),
член-корреспондент РАН,
620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18,
Телефон: (343) 374-59-34, 378-36-75
E-mail: mushnikov@imp.uran.ru



**Мушников
Николай
Варфоломеевич**



**Список работ Н.В. Мушников за 2011-2016 годы,
наиболее близких к теме диссертации С.В. Комогорцева**

1. Н.В. Мушников, А.П. Потапов, Д.А. Шишкин, А.В. Протасов, О.А. Головня, Н.Н. Щеголева, В.С. Гавико, К.Ю. Шуняев, В.А. Быков, Ю.Н. Стародубцев, В.Я. Белозеров. Магнитные свойства и структура нанокристаллических сплавов типа файнмет с различным содержанием железа // ФММ, 2015, т. 116, вып. 7, с. 701-708.
2. Н.В. Мушников. Магнитные материалы на основе интерметаллических соединений // УФН, 2012, т. 182, №4, с. 450-455.
3. V.V. Serikov, N.M. Kleinerman, A.V. Vershinin, N.V. Mushnikov, A.V. Protasov, L.A. Stashkova, O.I. Gorbato, A.V. Ruban, Yu.N. Gornostyrev. Formation of solid solutions of gallium in Fe-Cr and Fe-Co alloys: Mössbauer studies and first-principles calculations // J. Alloys and Compounds, 2014, v. 614, p. 297-304.
4. D.I. Gorbunov, S. Yasin, A.V. Andreev, N.V. Mushnikov, Ye.V. Rosenfeld, Y. Skourski, S. Zherlitsyn, J. Wosnitzer. Magnetic anisotropy and magnetic phase transitions in TmFe_5Al_7 // Phys. Rev B, 2014, v. 89, p.214417-1-10.
5. D.I. Gorbunov, S. Yasin, A.V. Andreev, Y. Skourski, N.V. Mushnikov, Ye.V. Rosenfeld, S. Zherlitsyn, J. Wosnitzer. Magnetic anisotropy and magnetic phase transitions in RFe_5Al_7 // J. Magn. Magn. Mater., 2015, v. 383, p. 208-214..
6. A.V. Vershinin, V.V. Serikov, N.M. Kleinerman, V.S. Gaviko, N.V. Mushnikov. Magnetic phase transitions in $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ ($x = 0.033$ and 0.096) compounds // J. Alloys Compounds, 2015, v. 621, p. 274-282..
7. N.V. Mushnikov, A.G. Kuchin, E.G. Gerasimov, P.B. Terentev, V.S. Gaviko, V.V. Serikov, N.M. Kleinerman, A.V. Vershinin. Magnetic phase transitions in $\text{Y}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_6\text{Sn}_6$, $\text{La}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$, $\text{Lu}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_{17}$, and $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ intermetallic compounds // J. Magn. Magn. Mater., 2015, v. 383, p. 196-202.
8. Н.В. Мушников. Магнитные и магнитоупругие свойства соединений с переменной валентностью на основе YbInCu_4 // Low Temperature Physics/Физика низких температур, 2015, т. 41, № 12, с. 1213–1236.
9. N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov. Magnetostriction of $\text{La}_{0.75}\text{Sm}_{0.25}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ compound // J. Alloys and Compounds, 2016, v. 676, p. 74-79.
10. E.G. Gerasimov, N.V. Mushnikov, A.A. Inishev, P.B. Terentev, V.S. Gaviko. Structure, magnetic and magnetothermal properties of the non-stoichiometric ErCo_2Mn_x alloys // J. Alloys and Compounds, 2016, v. 680, p. 359-365.

Ученый секретарь Института физики
металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН



Т.П. Суркова